ChinaXiv合作期刊

第 38 卷第 11 期
2018 年 6 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.38,No.11
Jun.,2018

DOI: 10.5846/stxb201705250970
孙程鹏,赵文智,杨淇越.绿洲边缘夹粘沙丘持水特性.生态学报,2018,38(11):3879-3888.
Sun C P, Zhao W Z, Yang Q Y.Water retention of the clay interlayer of dunes at the edge of an oasis.Acta Ecologica Sinica,2018,38(11):3879-3888.

绿洲边缘夹粘沙丘持水特性

孙程鹏[1,2],赵文智[1,*],杨淇越[1]

1 中国科学院西北生态环境资源研究院,中国生态系统研究网络临泽内陆河流域研究站,中国科学院内陆河流域生态水文重点实验室,兰州 730000

2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:夹粘沙丘是指剖面中分布有一层红褐色粘化层的沙丘,其夹粘层埋藏深度常在 120—500cm 左右,厚度在 40—100cm 之间,粘粉粒含量达到 90%以上。夹粘沙丘人工梭梭固沙植被郁闭度在 0.5 以上,明显高于相同水热条件下的植被生产力,这可能与夹粘层通过改变土壤持水性及水分状况,从而提高了土壤水分承载力有关。以河西走廊绿洲边缘夹粘沙丘为研究对象,在测定 0—8.0m 剖面土壤物理性质和土壤水分特征曲线的基础上,计算了土壤孔隙分布和持水特性,研究了剖面中土壤持水性的变化规律及其影响因素。结果表明:(1)夹粘层土壤含水量最高,上覆沙土土壤含水量最少且随深度增加而增加,下伏沙土受地下水毛管作用影响水分含量较高;(2)土壤机械组成决定了不同土层的持水特性,土壤中粘粉粒含量越高,田间持水量和饱和含水量就越大,夹粘层的土壤持水性远高于沙土层;(3)夹粘层是沙丘土壤水分暂时贮存的重要土层,可以为植被提供深层土壤水分,这对绿洲边缘人工固沙植被的生存和繁衍有重要影响,而土壤持水性和毛管作用的强弱决定了夹粘层对沙丘水分调节能力的强弱。本研究为深入理解绿洲边缘雨养固沙植被斑块状分布的机理提供了一定的理论依据。

关键词:绿洲边缘;沙丘;夹粘层;持水性

Water retention of the clay interlayer of dunes at the edge of an oasis

SUN Chengpeng[1,2], ZHAO Wenzhi[1,*], YANG Qiyue[1]

1 *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Linze Inland River Basin Research Station, Key Laboratory of Inland River Basin Ecohydrology, Lanzhou* 730000, *China*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: A sandwich dune′s profile consists of layers with different soil textures, the upper and lower of which are sandy soil layers, and there is a fine soil pan between the surface and the subsoil. The clay interlayer is composed of silty loam containing over 90% silt and clay. Deposits of this layer occur at depths of 120—500cm and it ranges in thickness from 40 to 100cm. In arid areas with precipitation of less than 200mm, artificial sand-fixing vegetation coverage is approximately 10% to 15%; however, the vegetation coverage of the study area with 117mm mean annual precipitation is approximately 65%, which does not meet the zonal water and heat conditions. Water retention is considered to play an important part in affecting the water conditions and soil water carrying capacity of dunes. With regards to water retention, Betti et al. have analyzed the effects of soil texture on water retention, revealing that when the sand content is increased, water retention becomes weaker, and the soil layer has a significant effect on the water-holding capacity, and their studies have focused on analysis of the water-holding capacity of homogeneous soil. In order to study the characteristics and mechanisms of the response of the clay interlayer to water retention, we measured the soil water characteristic curve based on the centrifuge test, particle size measured by Mastersizer-2000, and pore distribution based on the measured soil water characteristic curve

基金项目:国家自然科学基金项目(41630861,41501577)

收稿日期:2017-05-25; **网络出版日期:**2018-03-02

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaowzh@ lzb.ac.cn

chinaXiv:201806.00071v1

ChinaXiv合作期刊

and the calculated equivalent porosity at different depths of a sandwich dune. Our results show the following patterns. (1) The soil moisture content of the clay interlayer was the highest, soil water content increased slightly with depth in the surface soil, and the soil moisture of the subsoil was higher than in the surface, which was affected by the capillary action of groundwater. (2) Field capacity, wilting coefficient, saturated water content, total porosity, and aeration porosity were significantly correlated with soil physical properties, such as bulk density, sand content, clay content, and particle size. Sandy soil layers were at 0—4.0m and 4.6—8.0m. The soil water characteristic curves of these profiles were steep and the soil was loose (aeration porosity, 14%—27%) with poor soil water retention. The layer at 4.0—4.6m was an interbedded layer of silty loam, the soil water characteristic curves of which was smooth and the soil water content was high when the soil water suction was high.This type of soil had less aeration porosity, leading to higher soil water-holding capacity than the upper and lower sandy layers. Furthermore, correlation analysis showed that capillary porosity was not significantly correlated with soil physical properties, but was weakly related to soil water content, and increased significantly only at both the interface between the sandy layer and silty loam layer, and the water table. To a certain extent, the distribution of soil porosity affected the soil moisture content and water conveyance between the clay interlayer and the sand layer. In conclusion, soil textures lead to considerable differences in soil water retention of dunes at the edge of an oasis. The clay interlayer can hold more water compared with all profiles, which improves the water conditions of the dune. (3) The soil pan is the region where water collects, and provides water resources for plants. It plays an important role in the improvement of sand-fixing vegetation of dunes at the edge of an oasis. Further, the ability of the clay interlayer to regulate the water conditions of dunes depends on soil water retention and soil capillarity. In conclusion, our findings should provide strong support for future understanding of the mechanism of spatial patterns of artificial sand-fixing vegetation.

Key Words: oasis edge; dune; clay interlayer; water retention

绿洲边缘风沙活动频繁,环境脆弱,建立人工固沙植被是保护绿洲免遭风沙危害的重要措施[1]。从 1970 年代开始就在河西走廊绿洲边缘营造了大量的雨养梭梭人工固沙植被,原来均匀栽植的人工固沙植被经过多年的自然演替,呈斑块状分布[2]。降水量是干旱区人工固沙植被生长发育的关键因子[3],在降水量 200mm 左右的绿洲边缘,降水支撑的人工固沙植被盖度约为 10%[4]。而临泽绿洲边缘多年平均降水量为 117mm,但部分沙丘人工梭梭林斑块郁闭度却在 65%左右[5],这可能与沙丘剖面的夹粘层有关。

土壤质地可以通过改变剖面中土壤水分状况、土壤水分运移,使得土壤水分的异质性增加[6]。与均质土壤相比,含夹粘层土壤的稳渗率和湿润锋推进速度降低,土壤水分入渗减弱[7],其影响程度与夹粘层及组合土壤的水力学性质有关[8]。崔浩浩等[9]研究表明,粘土夹层可以显著提高土壤持水性。周海等[10]研究发现,绿洲边缘部分沙丘土壤剖面中分布有一层红褐色粘化层,梭梭粗根系生物量在夹粘层界面处显著增加。而有关夹粘层对土壤水分影响的研究目前多集中于土壤水分运移方面[11-12]。土壤机械组成、孔隙度、植被生长状况对土壤持水特性影响较大。研究发现,土壤持水能力在土层深度与植被类型间存在着显著差异[13],土壤容重与持水性能呈负相关[14],孔隙度的增加可以使土壤持水能力提高[15],土层间持水性的变动幅度存在较大差异。闫永利等[16]和王元峰等[17]指出随土壤粘粒含量减少,土壤质地由粘变砂时,其持水性减弱;同时研究表明,土层结构对土壤的持水性能也有显著影响,上部为砂壤土、底部为砂土、中间为亚粘土的壤粘沙型结构持水性能最好,单一沙型的土层结构最差[9]。

夹粘沙丘在干旱区特别是荒漠绿洲边缘呈不连续分布,研究夹粘层土壤持水特性及其对沙丘剖面土壤水分状况的影响,对于认识降水量 100mm 左右雨养植被的生长发育、指导人工植被的建设具有重要意义[18]。本研究选择绿洲边缘夹粘沙丘,通过开挖 0—8.0m 剖面,测定土壤物理性质和水分特征曲线,探讨剖面中土壤持水性的变化规律及其影响因素,旨在揭示绿洲边缘夹粘沙丘土壤持水特性,为深入了解夹粘沙丘人工梭梭固沙林发育与演化提供依据。

chinaXiv:201806.00071v1

ChinaXiv合作期刊

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于河西走廊中部临泽荒漠-绿洲过渡带(图 1),海拔约 1386m,该区为典型的大陆性荒漠气候,年均气温 7.6℃,多年平均降水量 117mm,降水多集中在 7—9 月份,且以小降水事件为主,年潜在蒸发量约为 2360mm。地下水埋深一般在 5—10m,地下水主要靠降水补给且呈季节性变化。地貌类型主要为风成地貌,土壤类型主要有灰棕漠土和风沙土,土壤分层明显,常见粘土夹层。代表性植物有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、柽柳(*Tamarix chinensis*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等。

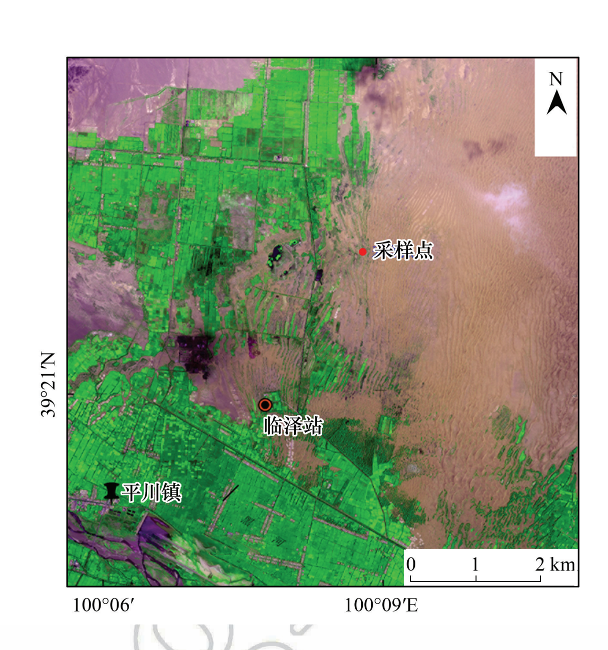


图 1　研究区概况及采样点图

Fig.1　Research area and sampling map

1.2　研究方法

1.2.1　土样采集及分析

在试验区开挖大型土壤剖面,根据土壤剖面的植被根系、土壤颜色等划分层次结构,分别在距土壤表面 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、4.0、4.3、4.6、5.0、8.0m 的深度使用环刀采集原状土,重复 5 次,其中 4.0m 和 4.6m 分别是夹粘层与沙土层的交界面。同时,取适量鲜土样品置于铝盒和自封袋中,带回实验室测定土壤含水量和机械组成。土壤含水量、容重、孔隙度和饱和含水量用烘干法测定;利用激光粒度仪(Mastersizer-2000)测定土样的颗粒组成;采集的原状土环刀置于水中(沙土浸泡 12h,粘土浸泡 24h),在 25℃下设定 14 个不同转速(转速对应的土壤水吸力分别为 0.001、0.005、0.01、0.02、0.04、0.06、0.08、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0MPa),利用离心机(H-1400pf)离心至平衡后测量设定吸力对应的土壤质量含水量,获得各剖面土壤水分特征曲线。

1.2.2　土壤孔隙分布

土壤孔隙分布可以反映土壤的持水特性,不同种类孔隙的分布可以通过土壤水分特征曲线计算当量孔径获得,当量孔径计算公式为[19]:

$$d = \frac{3 \times 10^{-5}}{h}$$

式中,d 为当量孔径(mm);h 为土壤水吸力(MPa)。

本文中土壤水吸力对应的当量孔径分别为 300、60、30、15、7.5、5、3.75、3、1.5、0.6、0.3、0.2、0.15μm,各级别孔隙划分标准为[19]:通气孔隙>10μm、毛管孔隙在 2—10μm、非活性孔隙<2μm。

1.2.3　土壤持水性

田间持水量和凋萎系数常用来衡量土壤的持水特性,可以通过土壤水分特征曲线计算得到,一般认为田间持水量为 101.97cm H_2O 对应的土壤含水量[20],凋萎系数为 15295.5cm H_2O 对应的土壤含水量[21]。

2　结果分析

2.1　沙丘剖面土壤物理特征

土壤深度 0—4.0m 和 4.6—8.0m 均为沙土,砂粒含量均高于 92%;深度在 4.0—4.6m 的为粉壤土,粉粒含量达到 80.41%;沙丘剖面土壤质地差异显著,从上到下依次是沙土、粉壤土、沙土(表 1)。

chinaXiv:201806.00071v1

ChinaXiv合作期刊

表 1 沙丘剖面土壤颗粒组成

Table 1 Soil particle composition of the profile of sand dune

土壤剖面/m Soil profile	粘粒/% Clay content	粉粒/% Silt content	砂粒/% Sand content	颗粒直径/mm Particle size	土壤质地(美国制) Soil texture
0.1	0.43±0.71	4.92±0.11	94.63±0.16	63.98±0.77	砂土
0.2	0.31±0.06	4.33±0.07	95.36±0.12	77.25±2.49	砂土
0.4	1.08±0.69	5.88±0.04	93.03±0.05	40.56±0.31	砂土
0.6	0.74±0.11	6.33±0.19	92.91±0.19	48.07±0.59	砂土
0.8	0.41±0.05	5.14±0.22	94.44±0.28	65.14±1.69	砂土
1.0	1.14±0.04	5.42±0.12	93.43±0.16	39.78±1.09	砂土
1.5	0.92±0.16	4.86±0.25	94.2±0.42	48.78±2.82	砂土
2.0	0.96±0.94	6.44±0.02	92.59±0.01	42.7±0.06	砂土
2.5	1.03±0.01	6.08±0.01	92.88±0.87	41.58±0.26	砂土
3.0	1.05±0.02	4.93±0.08	94.24±0.16	43.72±0.71	砂土
4.0	9.32±0.34	45.8±0.61	44.87±0.36	5.97±0.17	壤土
4.3	12.14±0.66	80.41±0.07	7.43±0.13	4.01±0.01	粉壤土
4.6	5.14±0.73	18.99±0.05	75.85±0.15	10.86±0.30	砂壤土
5.0	0.11±0.37	3.36±0.04	96.51±0.43	83.99±0.94	砂土
8.0	0.14±0.02	4.25±0.06	95.6±0.84	78.27±0.05	砂土

土壤表层(0—0.2m)含水量较低(图 2),0.2—4.0m 土壤含水量随土壤深度增加而增加(0.005—0.017g/cm³)。土壤含水量在 4.0—4.6m 层处达到最大(0.241g/cm³);4.6—8.0m 沙层水分含量逐渐增大,直至在8.0m 处到达潜水面,土壤水分达到饱和(0.231g/cm³)。

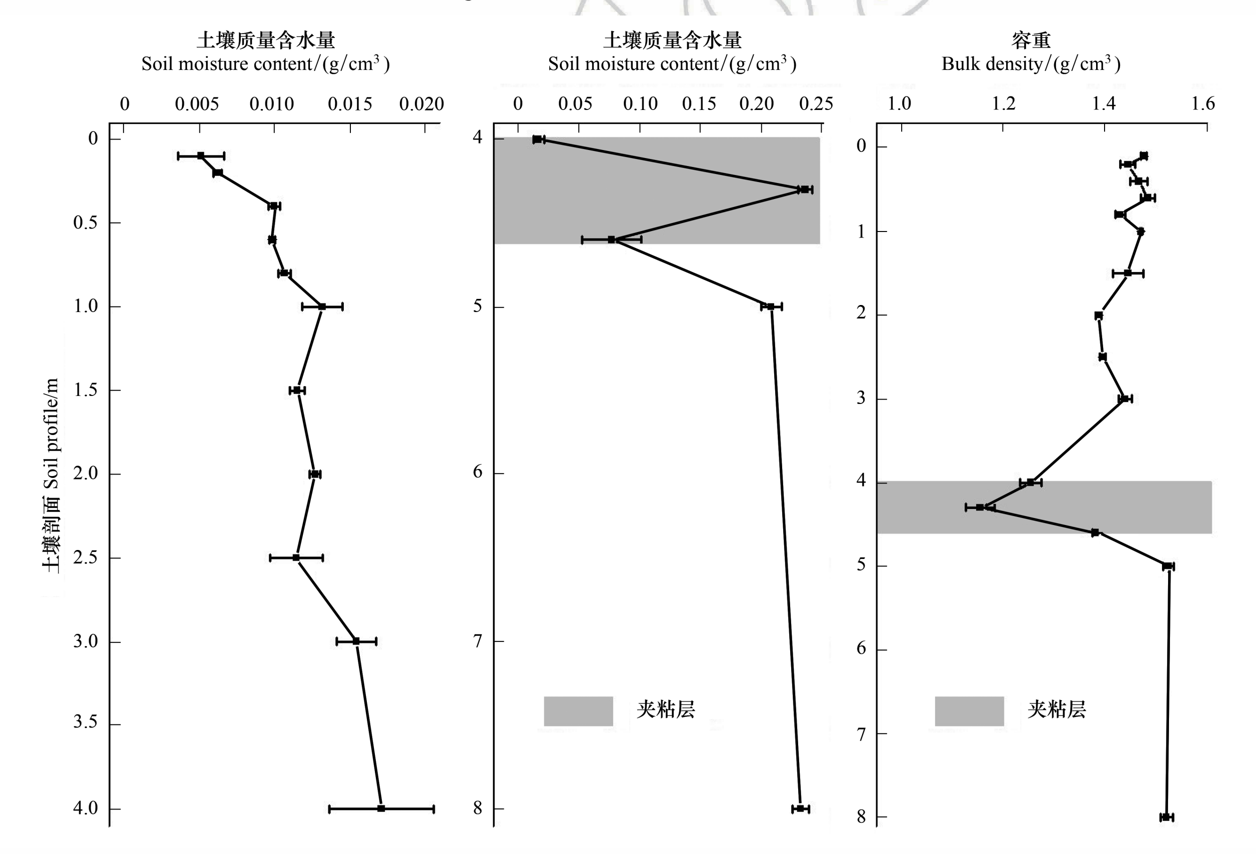


图 2 沙丘剖面土壤水分及容重

Fig.2 Soil moisture and bulk density of the profile of sand dune

2.2 沙丘土壤水分特征曲线

采用对沙土拟合效果较好的 van Genuchten 模型对沙丘土壤水分特征曲线进行拟合[22],表达式如下,

chinaXiv:201806.00071v1

ChinaXiv合作期刊

$$\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}=[1+(\alpha h)^n]^m$$

式中,θ 为体积含水量(%);θ_r为残余含水量(%);θ_s为饱和含水量(%);h 为土壤水吸力(cmH_2O);α 为尺度参数,是与土壤进气吸力相关的系数;m、n 为经验拟合参数,$m=1-1/n$,$n>1$;h 为土壤水吸力(cmH_2O)。

基于 Matlab R2010a 得到的沙丘不同土层深度土壤水分特征曲线的拟合与验证结果显示(表 2),R^2的取值范围为 0.975—0.998,且 RMSE 均小于 0.02,表明 van Genuchten(VG)模型对夹粘沙丘土壤水分特征曲线的拟合精度高。

表 2　沙丘剖面土壤水分特征曲线拟合参数

Table 2　Fitted parameters of soil water characteristic curves of the profile of sand dune

土壤剖面 Soil profile/m	θ_r	θ_s	α	n	RMSE	R^2
0.1	0.0429	0.2834	0.0096	2. 8901	0.0114	0.9847
0.2	0.0285	0.3033	0.0091	2.8410	0.0149	0.9775
0.4	0.0467	0.3015	0.0074	2.6495	0.0083	0.9934
0.6	0.0352	0.2845	0.0079	2.5482	0.0091	0.9916
0.8	0.0320	0.3300	0.0184	2.7980	0.0147	0.9754
1.0	0.0454	0.3376	0.0144	2.8279	0.0072	0.9946
1.5	0.0406	0.3090	0.0090	2.2288	0.0127	0.9843
2.0	0.0403	0.3138	0.0083	2.7011	0.0080	0.9944
2.5	0.0475	0.3284	0.0088	2.7273	0.0071	0.9957
3.0	0.0481	0.3241	0.0104	2.7779	0.0077	0.9932
4.0	0.1565	0.4313	0.0116	1.5800	0.0085	0.9903
4.3	0.2019	0.4818	0.0160	1.0278	0.0047	0.9897
4.6	0.0680	0.4102	0.0153	1.1436	0.0028	0.9983
5.0	0.0398	0.3338	0.0108	2.9588	0.0073	0.9952
8.0	0.0377	0.3546	0.0072	2.6086	0.0052	0.9981

θ_r:残余含水量,Residual moisture content;θ_s:饱和含水量,Saturated moisture content;h:土壤水吸力,Soil water suction;α:与土壤进气值相关的尺度参数,Parameter corresponding approximately to the inverse of the air-entry value; n:经验拟合参数,Model fitting parameters;RMSE:均方根误差,Root mean square error;R^2:判定系数,Coefficient of determination。

4.0—4.6m 土层的土壤水分特征曲线位置最高,夹粘层与沙土层界面处(4.0m 和 4.6m)次之,而 0—4.0m 和 4.6—8.0m 土层范围的最低(图 3)。在低吸力段(0—1000cmH_2O),土壤含水量随土壤水吸力增大而急剧减少,0—4.0m 层和 4.6—8.0m 层与其他土层相比,曲线陡直,土壤释水速率快。在中高吸力段(>1000cmH_2O),土壤水吸力增大时,土壤水分减少速率明显减慢,0—4.0m 层和 4.6—8.0m 层土壤水分随吸力变化趋于稳定,曲线平稳,而 4.0—4.6m 层土壤含水量随土壤水吸力增加仍缓慢减小。

2.3　沙丘剖面土壤孔隙分布

沙丘剖面孔隙数量在 4.0—4.6m 层明显增多($P<0.01$),0—4.0m 层与 4.6—8.0m 层总孔隙度小且无显著差别($P>0.05$,图 4)。而通气孔隙在 4.0—4.6m 层最少(2.24%),4.6—8.0m 层次之(20.20%),0—4.0m 层最大(22.39%),4.6—8.0m 层通气孔隙度随深度增加逐渐减少。沙丘剖面毛管孔隙度随土壤深度增加变化较小,仅在夹粘层与沙土层界面处和潜水面(8.0m)处显著增大,且下交界面的毛管孔隙(6.56%)略少于上交界面(7.35%)毛管孔隙逐渐增加至最大值(12.73%)。

2.4　沙丘剖面土壤持水性能

利用土壤水分特征曲线拟合方程计算出各深度土层的田间持水量、凋萎系数和有效含水量(图 5)。上下沙层凋萎系数基本相等,平均值为 0.029cm^3/cm^3;4.0—4.6m 层凋萎系数最高,平均值为 0.21cm^3/cm^3。田间持水量和饱和含水量在夹粘层最高,并在 4.6—8.0m 土层内随土层深度增大而缓慢增加。而有效含水量在夹粘层最低(0.094cm^3/cm^3),且具有明显的空间分异性。夹粘层与沙土层界面处的持水性略有不同,上交界面的田间持水量、凋萎系数和有效含水量均小于下交界面,但饱和含水量高于下交界面。

chinaXiv:201806.00071v1

ChinaXiv合作期刊

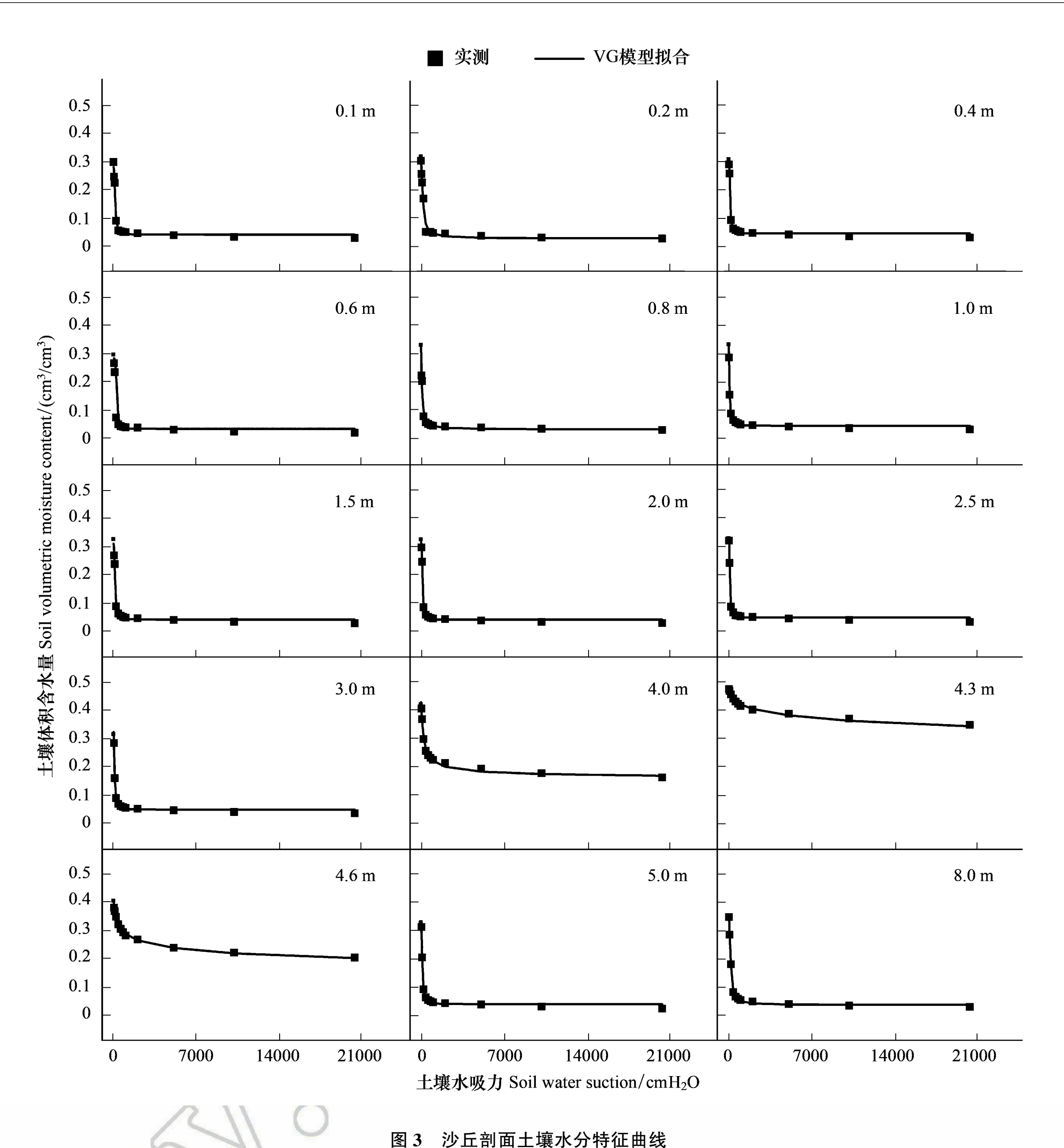


图 3 沙丘剖面土壤水分特征曲线

Fig.3 Soil water characteristic curve of profile of sand dune

3 讨论

3.1 夹粘沙丘剖面持水性特征

土壤水分特征曲线是描述土壤基质势与土壤含水量之间关系的曲线,是研究土壤水分运动的关键[23]。曲线的高低可以反映土壤持水能力的强弱[24],郑健等[25]通过研究植物混掺土壤的土壤水分特征曲线及其对土壤持水能力的影响发现,土壤水分特征曲线位置高则土壤持水能力较强,反之土壤持水性较差。本研究发现,4.0—4.6m 土壤水分特征曲线曲线位置最高,0—4.0m 和 4.6—8.0m 土壤水分特征曲线位置较低(图 3),说明夹粘层比沙层持水性能好。但在低吸力段,4.6—8.0m 层比 0—4.0m 层的曲线位置高,主要原因是土壤孔隙分布特征会直接影响土壤水分运动规律[26],即在低吸力段土壤排水主要在通气孔隙中进行[27],当通气孔隙比例增加,土壤在同一吸力下会释出更多水,从而使得土壤水分特征曲线位置降低[28]。而本试验发现 0—4.0m的土壤通气孔隙多于 4.6—8.0m 层(图 4),使得土壤持水能力减弱,因此在低吸力段 0—4.0m 土壤的水

chinaXiv:201806.00071v1

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201806.00071v1

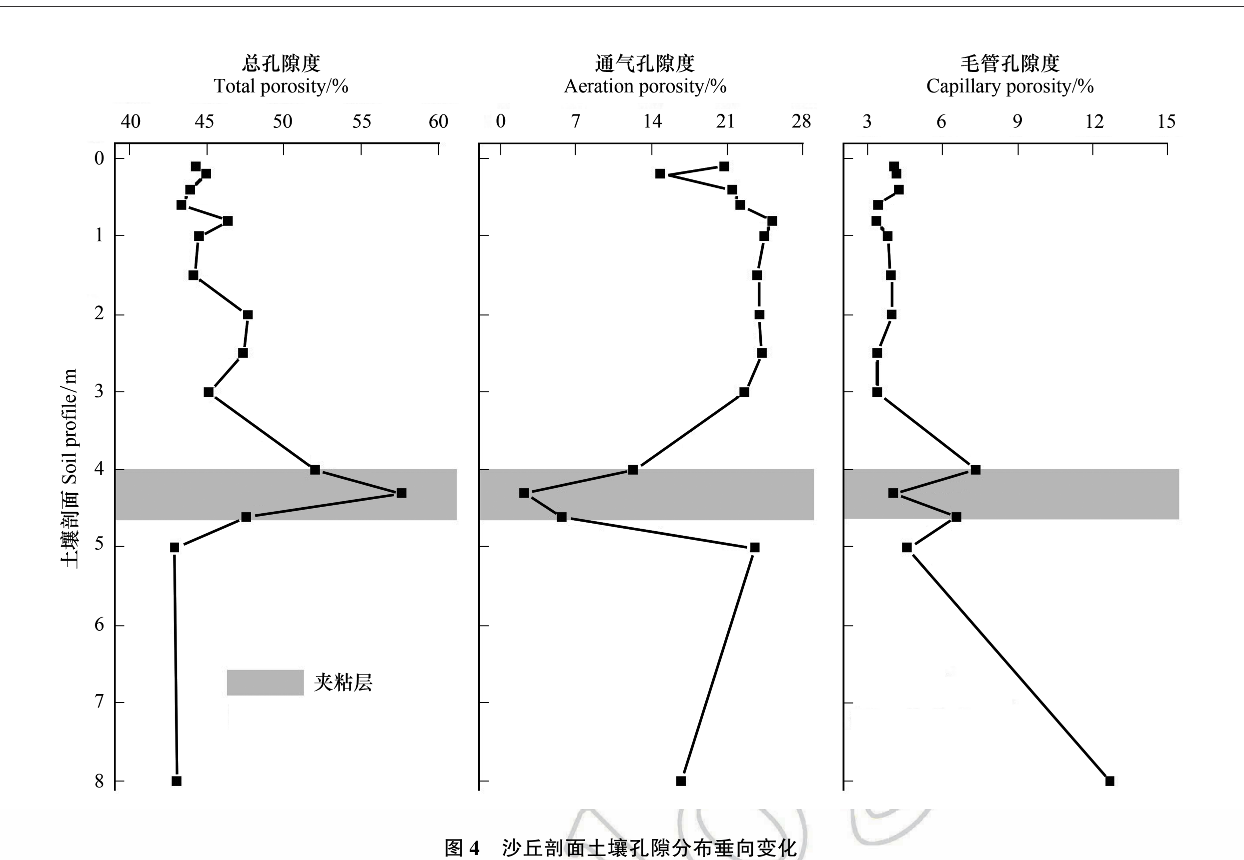


图 4　沙丘剖面土壤孔隙分布垂向变化

Fig.4　Soil porosity distribution of the profile of sand dune

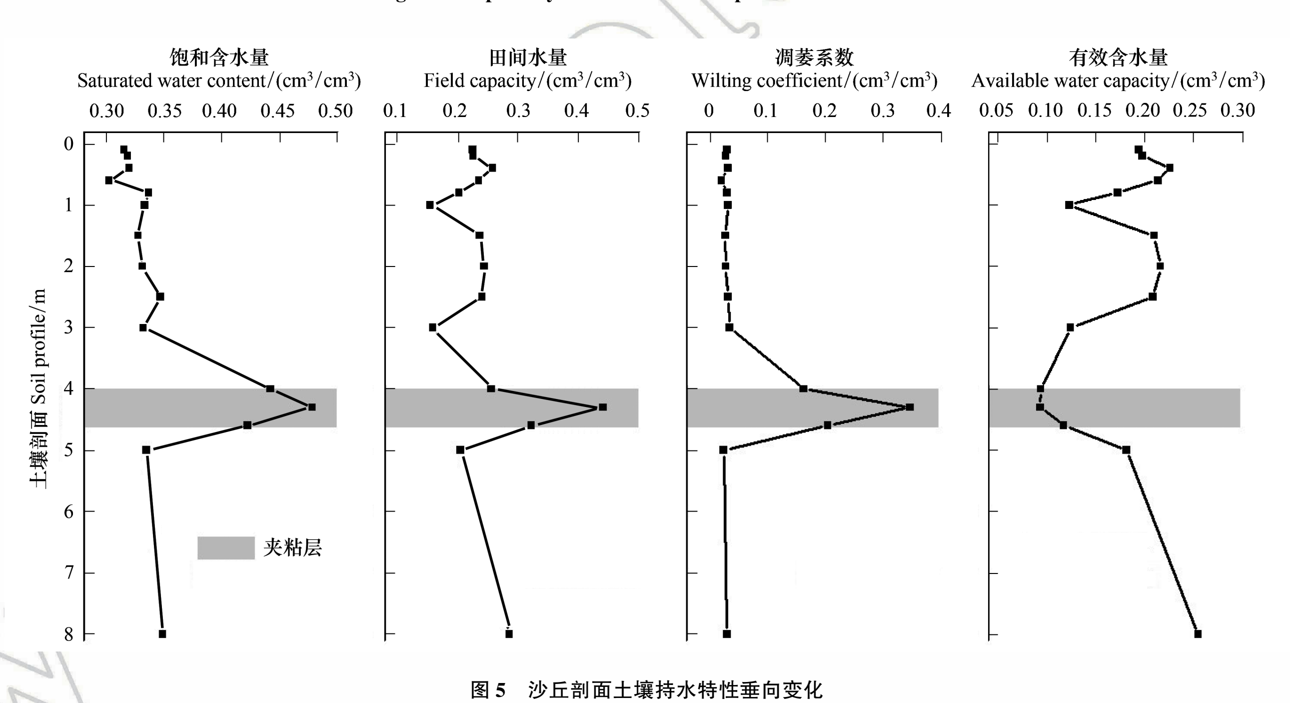


图 5　沙丘剖面土壤持水特性垂向变化

Fig.5　Soil water retention characteristics of the profile of sand dune

分特征曲线斜率变化较大、位置较低。

土壤持水性是指土壤对水分的吸持和贮存能力[29],决定了土壤水分供给的有效性[30]。田间持水量、凋萎系数和饱和含水量是表征土壤持水能力的重要指标[31],能够直观地反映土壤的持水性能。周印东等[32]在子午岭北部的研究认为,田间持水量和饱和含水量大则土壤持水性高。本研究结果表明,粉壤质夹粘层土壤的饱和含水量和田间持水量高于上下沙层(图 5),说明夹粘土壤持水性能好于沙土层。有效含水量可以衡量

ChinaXiv合作期刊

chinaXiv:201806.00071v1

表 3 土壤持水性与土壤因子相关性

Table 3 Correlation coefficients between soil properties and soil retention of sand dunes at edge of oasis

项目 Project	田间持水量 Field capacity	凋萎系数 Wilting coefficient	通气孔隙度 Aeration porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	土壤容重 Bulk density	总孔隙度 Total porosity	粘粒含量 Clay content	粉粒含量 Silt content	砂粒含量 Sand content	颗粒直径 Particle size	土壤含水量 Soil moisture	饱和含水量 Saturated water content
凋萎系数 Wilting coefficient	0.84**											
通气孔隙度 Aeration porosity	−0.83**	−0.90**										
毛管孔隙度 Capillary porosity	0.28	0.11	−0.35									
土壤容重 Bulk density	−0.69**	−0.88**	0.70**	0.07								
总孔隙度 Total porosity	0.72**	0.89**	−0.70**	−0.05	−0.99**							
粘粒含量 Clay content	0.74**	0.95**	−0.82**	0.11	−0.94**	0.93**						
粉粒含量 Silt content	0.79**	0.94**	−0.79**	0.07	−0.93**	0.94**	0.97**					
砂粒含量 Sand content	−0.78**	−0.94**	0.80**	−0.08	0.94**	−0.94**	−0.98**	−0.99**				
颗粒直径 Particle size	−0.52	−0.76**	0.59*	0.08	0.82**	−0.76**	−0.82**	−0.72**	0.74**			
土壤含水量 Soil moisture	0.58*	0.47	−0.47	0.53*	−0.17	0.26	0.34	0.43	−0.42	0.07		
饱和含水量 Saturated water content	0.76**	0.95**	−0.85**	0.27	−0.88**	0.88**	0.95**	0.91**	−0.92**	−0.76	0.46	
有效含水量 Available water capacity	−0.21	−0.70**	0.54*	0.16	0.68**	−0.66**	−0.74**	−0.66**	0.68**	0.69**	−0.07	−0.72**

** 表示在 0.01 级别相关性显著; * 表示在 0.05 级别相关性显著

ChinaXiv合作期刊

土壤水分有效性,有效含水量即田间持水量与凋萎系数之差,有效含水量高则土壤水分有效性大[33]。本研究发现,凋萎系数在 4.0—4.6m 层显著增大($P<0.01$)。有效含水量在沙丘不同深度波动较大,且 4.0—4.6m 层的有效含水量最小,这表明夹粘层土壤虽可以吸持更多的水分,但土壤水分有效性却小于沙土层,这与李玉山对黄土高原下伏粘化层的持水特性研究结果不同,可能是土壤粘化层的胶膜发育程度不同造成的[20]。

3.2　夹粘沙丘剖面土壤持水性的影响因素

很多因素可以导致土壤持水性能的改变,如土壤粘粉粒含量[34]、有机质含量[35]、孔隙分布状况[36]、电导率[37]等。土壤物理性质及有机质含量是影响土壤持水性的主要因素[38]。Betti 等[36]在南澳大利亚的研究发现,土壤容重、砂粒含量和大孔隙增多会导致土壤持水性减弱,但土壤水分有效性增大。本研究结果表明,土壤容重、机械组成、通气孔隙度等对田间持水量、凋萎系数、饱和含水量大小影响显著(表 3)。沙土层质地粗,土壤内通气孔隙分布多且连通性好,土壤持水特性较差。当土壤粘粉粒含量增加,通气孔隙占比减小,土壤对水分吸持能力强。而 4.6—8.0m 层土壤砂粒含量高于 0—4.0m 层(表 1),其容重及通气孔隙度均小于 0—4.0m层(图 2,图 4),但其田间持水量及饱和含水量却小于 0—4.0m 层(图 5)。郝芳华等[39]认为土壤深层水分毛管作用明显,会导致土壤持水性增强。本研究也发现,毛管孔隙分布与土壤容重、机械组成、孔隙度、颗粒直径等均无显著关系($P>0.05$),仅与土壤含水量存在弱相关性。4.6—8.0m 层土壤含水量随深度增加而增大,毛管孔隙度也随土壤深度增加而增大(图 4),且显著大于 0—4.0m 层。4.0—4.6m 层土壤含水量最高,但其毛管孔隙度基本等于 0—4.0m 层,但在沙土与粉壤土界面处显著增大,说明土壤质地和透水性的不同均会引起毛管孔隙数量的增多,并最终会影响土壤持水性能。

3.3　夹粘沙丘剖面土壤水分状况

夹粘沙丘土壤表层(0—0.2m)为干沙层,能够抑制下层土壤水分蒸发[40],因此 0.2m 以下土壤含水量较高。4.0—4.6m 为粉壤质夹粘层,土壤含水量最高,4.6—8.0m 由于受地下水的毛管作用影响,土壤含水量高于 0—4.0m(图 2)。大部分土壤水分运动发生在毛管孔隙中[41],而夹粘层与沙土层界面处受毛管作用影响,土壤含水量也高于其他剖面。可见,沙丘剖面土壤孔隙的分布特征能在一定程度上影响土壤水分含量及水分交换。由土壤水分特征曲线和沙丘剖面水分分布可知,4.6—8.0m 层土水势最高,下层土壤水分仍能向上运移至土壤含水量最高的夹粘层,并贮存在夹粘层中。当 0—4.0m 层沙土土壤水分降低,水势降低至小于夹粘层土水势时,夹粘层可以向上输送水分,从而改善沙丘的土壤水分条件。但夹粘层与沙土层间土壤水分的交换阈值、夹粘层毛管作用高度、夹粘层厚度及夹粘层位置对沙丘水分的影响仍需进一步研究。

4　结论

(1)沙丘剖面中,夹粘层土壤持水性远高于上下沙层。土壤颗粒组成和孔隙分布是影响夹粘沙丘土壤持水性的主要因素,砂粒含量越高,通气孔隙数量越少,毛管作用越明显,则土壤持水性越强;反之,则越弱。

(2)夹粘沙丘剖面中土壤水分分布差异较大,夹粘层土壤含水量最高,明显高于上下沙层。夹粘层是深层土壤水分向上层沙土运移的过渡层,该层土壤含水量高,但土壤水分有效性差,很难被植被吸收利用。

(3)夹粘层具有贮存深层土壤水分和为上覆沙土层传输水分的双重作用,这对改善沙丘土壤水分状况有重要影响,其调节沙丘土壤水分的能力取决于土壤持水性及毛管作用的强弱。沙丘中夹粘层的分布可以通过改变土壤水分状况从而改变植被的生长发育状况,这可能是降水量 100mm 左右绿洲边缘雨养植被斑块状分布的影响因素。

参考文献(References):

[1] 解婷婷, 苏培玺, 周紫鹃, 李善家, 张海娜. 荒漠绿洲过渡带不同立地条件下物种多样性及其与土壤理化因子的关系. 中国沙漠, 2013, 33(2): 508-514.

[2] Zheng Y, Zhao W Z, Zhang G F. Spatial analysis of a *Haloxylon Ammodendron* plantation in an oasis-desert ecotone in the Hexi corridor, Northwestern China. Forests, 2017, 8(6): 200.

chinaXiv:201806.00071v1

ChinaXiv合作期刊

[3] Li X R, Tan H J, He M Z, Wang X P, Li X J. Patterns of shrub species richness and abundance in relation to environmental factors on the Alxa Plateau: Prerequisites for conserving shrub diversity in extreme arid desert regions. Science in China Series D: Earth Sciences, 2009, 52(5): 669-680.
[4] 李新荣, 张志山, 谭会娟, 高艳红, 刘立超, 王新平. 我国北方风沙危害区生态重建与恢复: 腾格里沙漠土壤水分与植被承载力的探讨. 中国科学: 生命科学, 2014, 44(3): 257-266.
[5] Zhou H, Zhao W Z, Zhang G F. Varying water utilization of *Haloxylon ammodendron* plantations in a desert-oasis ecotone. Hydrological Processes, 2017, 31(4): 825-835.
[6] 孙飞达, 陈文业, 袁海峰, 窦英杰, 邴丹珲, 冯颖, 吴婷. 甘肃敦煌西湖荒漠-湿地生态系统土壤水分空间异质性及其影响因子研究. 西北植物学报, 2016, 36(1): 165-173.
[7] 甄庆, 摄晓燕, 张应龙, 韩凤朋, 张兴昌. 晋陕蒙能源区不同构型土体水分入渗特性模拟. 农业机械学报, 2015, 46(8): 90-96.
[8] 李韵珠, 胡克林. 蒸发条件下粘土层对土壤水和溶质运移影响的模拟. 土壤学报, 2004, 41(4): 493-502.
[9] 崔浩浩, 张冰, 冯欣, 高业新. 不同土体构型土壤的持水性能. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 1-5.
[10] Zhou H, Zhao W Z, Yang Q Y. Root biomass distribution of planted *haloxylon ammodendron* in a duplex soil in an oasis: desert boundary area. Ecological Research, 2016, 31(5): 673-681.
[11] 卢修元, 魏新平, 邱玥, 倪福全. 砂土中粘土夹层对入渗过程影响的试验分析. 灌溉排水学报, 2009, 28(6): 39-41.
[12] 刘思义, 魏由庆, 梁国庆, 邢文刚, 王应求. 粘土夹层土体构型水盐运动的实验研究. 土壤学报, 1992, 29(1): 109-112.
[13] 鲍乾, 梁建发, 王棋, 杨瑞. 花江喀斯特石漠化区不同经济型植物的土壤蓄水特征. 水土保持研究, 2017, 24(1): 18-24.
[14] 丁新原, 张广宇, 周智彬, 王永东, 鲁晶晶, 黎小娟. 咸水滴灌条件下塔里木沙漠公路防护林土壤水分物理性质. 水土保持学报, 2015, 29(1): 250-256.
[15] 孔超, 王美艳, 史学正, 徐胜祥, 郭乃嘉, 杨培强. 基于低场核磁技术研究土壤持水性能与孔隙特征. 土壤学报, 2016, 53(5): 1130-1137.
[16] 闫永利, 魏占民, 任秀苹, 奇凤. 保水剂对土壤持水性影响及在不同土壤中效果比较. 节水灌溉, 2016, (1): 34-38.
[17] 王元峰, 王辉, 马维伟, 冯宜明, 李俊臻. 尕海 4 种湿地类型土壤水分特性研究. 干旱区研究, 2012, 29(4): 598-603.
[18] Xu G Q, Li Y. Rooting depth and leaf hydraulic conductance in the xeric tree *Haloxyolon ammodendron* growing at sites of contrasting soil texture. Functional Plant Biology, 2008, 35(12): 1234-1242.
[19] 吴奇凡, 樊军, 王继军. 晋陕蒙接壤区露天矿不同质地土壤水分运动特征与模拟. 煤炭学报, 2015, 40(5): 1134-1142.
[20] 李玉山. 黄土高原土壤水分循环与农田生产力. 西安: 陕西人民出版社, 2015: 28-29.
[21] 马昌臣, 王飞, 穆兴民, 康绍忠. 小麦根系机械作用对土壤水分特征曲线的影响. 水土保持学报, 2013, 27(2): 105-109.
[22] Wang Y Q, Ma J Z, Zhang Y L, Zhao M Z, Edmunds W M. A new theoretical model accounting for film flow in unsaturated porous media. Water Resources Research, 2013, 49(8): 5021-5028.
[23] 王俊, 黄岁樑. 土壤水分特征曲线模型对数值模拟非饱和渗流的影响. 水动力学研究与进展, 2010, 25(1): 16-22.
[24] 李广文, 冯起, 张福平, 成爱芳. 黑河上游草地土壤水分特征曲线研究. 干旱区资源与环境, 2015, 29(10): 128-134.
[25] 郑健, 王燕, 蔡焕杰, 万吉祥, 李志军. 植物混掺土壤水分特征曲线及拟合模型分析. 农业机械学报, 2014, 45(5): 107-112.
[26] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 67-70.
[27] 郑荣伟, 冯绍元, 郑艳侠. 北京通州区典型农田土壤水分特征曲线测定及影响因素分析. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 77-81.
[28] 王志超, 李仙岳, 史海滨, 徐鹏程, 李河. 含残膜土壤水分特征曲线模型构建. 农业工程学报, 2016, 32(14): 103-109.
[29] 王燕, 宫渊波, 尹艳杰, 郭挺, 刘珊珊, 李渊, 马金松. 不同林龄马尾松人工林土壤水土保持功能. 水土保持学报, 2013, 27(5): 23-27.
[30] 李卓, 吴普特, 冯浩, 赵西宁, 黄俊, 庄文化. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究. 土壤学报, 2010, 47(4): 611-620.
[31] 王丹丹, 郑纪勇, 颜永毫, 张兴昌. 生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究. 水土保持学报, 2013, 27(2): 101-104, 109.
[32] 周印东, 吴金水, 赵世伟, 郭胜利, 路鹏. 子午岭植被演替过程中土壤剖面有机质与持水性能变化. 西北植物学报, 2003, 23(6): 895-900.
[33] 刘祖香, 陈效民, 靖彦, 黄欠如, 李秋霞. 典型旱地红壤水力学特性及其影响因素研究. 水土保持通报, 2013, 33(2): 21-25.
[34] 周萍, 刘国彬, 文安邦, 贺秀斌, 严冬春, 龙翼, 鲍玉海. 黄土丘陵区不同林龄乔灌林地土壤水分及持水性能研究. 水土保持研究, 2010, 17(1): 188-193.
[35] 魏强, 凌雷, 柴春山, 张广忠, 闫沛斌, 陶继新, 薛睿. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤理化性质. 生态学报, 2012, 32(15): 4700-4713.
[36] Betti G, Grant C D, Murray R S, Churchman G J. Size of subsoil clods affects soil-water availability in sand-clay mixtures. Soil Research, 2016, 54(3): 276-290.
[37] He Y B, Desutter T, Casey F, Clay D, Franzen D, Steele D. Field capacity water as influenced by Na and EC: implications for subsurface drainage. Geoderma, 2015, 245-246: 83-88.
[38] Rab M A, Chandra S, Fisher P D, Robinson N J, Kitching M, Aumann C D, Imhof M. Modelling and prediction of soil water contents at field capacity and permanent wilting point of dryland cropping soils. Soil Research, 2011, 49(5): 389-407.
[39] 郝芳华, 孙铭泽, 张璇, 欧阳威, 郭波波, 黄浩波. 河套灌区土壤水和地下水动态变化及水平衡研究. 环境科学学报, 2013, 33(3): 771-779.
[40] 鲁瑞洁, 唐清亮, 桑艳礼, 魏殿生, 张登山, 石昊, 贾飞飞, 尚媛, 田丽慧. 青海湖克土沙区不同类型沙丘土壤水分的动态变化. 水土保持研究, 2012, 19(2): 111-115.
[41] 赵迪, 黄爽, 黄介生. 生物炭对粉黏壤土水力参数及胀缩性的影响. 农业工程学报, 2015, 31(17): 136-143.

chinaXiv:201806.00071v1